第41卷 第11期
2024年11月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 41 No. 11
Nov. 2024

沙化草地恢复中小叶锦鸡儿对植被和土壤的影响

朱甜甜[1]， 海 鹭[2]， 曹文旭[1]， 李 旭[1]， 李清河[1]

（1. 中国林业科学研究院林业研究所，林木资源高效生产全国重点实验室，国家林业和草原局林木培育重点实验室，北京 100091；2. 中国林业科学研究院沙漠林业实验中心，内蒙古 磴口 015200）

摘 要：小叶锦鸡儿（*Caragana microphylla*）是沙化草地促进植被恢复中常用的灌木树种，解析其在不同沙化草地恢复阶段对灌丛内植被和土壤理化特征的影响，对沙地植被恢复和可持续发展具有重要意义。本研究以呼伦贝尔沙地中半固定沙地、固定沙地和沙质草地3个典型沙化草地植被恢复阶段的小叶锦鸡儿灌丛为研究对象，通过方差分析、Pearson相关分析及冗余分析方法，探讨不同沙化草地植被恢复阶段小叶锦鸡儿灌丛下植被群落和土壤理化特征变化及其二者的关系。结果表明：（1）随着沙化草地植被恢复程度的增强，灌丛内植被物种丰富度、Shannon-Wiener指数、群落高度和生物量增加。灌丛内的群落高度和生物量均高于灌丛外，在半固定沙地和固定沙地阶段灌丛内植被物种丰富度高于灌丛外。（2）在0~10 cm和10~20 cm土层中，土壤含水量呈现逐渐增加的趋势，最高值在沙质草地阶段（1.2%），且灌丛内高于灌丛外。黏粒和粉粒含量随着沙地植被恢复程度的增加逐渐增加，且灌丛内高于灌丛外，沙粒则表现相反。（3）随着植被恢复程度的增加，土壤有机碳逐渐增加，最高值在沙质草地阶段（4.12 $g\cdot kg^{-1}$），表现为灌丛内高于灌丛外。土壤全氮从半固定沙地到固定沙地阶段增加，各阶段均表现为灌丛内高于灌丛外。随着植被恢复程度的增加，灌丛内土壤pH减小。土壤全磷无显著变化。（4）土壤理化特征分别解释了灌丛内外植被变化的59.6%和46.9%，其中主要影响因子是土壤粒径、全氮、含水量和有机碳。本研究表明在沙化草地植被恢复过程中，小叶锦鸡儿灌丛通过改善灌丛下土壤理化特征，包括土壤粒径、含水量、有机碳和全氮，对植被生长发育具有促进作用。

关键词：沙化草地植被恢复；小叶锦鸡儿；植被特征；土壤理化特征；呼伦贝尔

呼伦贝尔是我国北方干旱与半干旱过渡地带保存完好的天然草原牧区之一。上世纪，由于自然环境恶化、开垦荒地、放牧和人类过度开挖等不合理活动，加剧了呼伦贝尔草场沙化，形成了呼伦贝尔沙地。呼伦贝尔沙地处于生态交错区，是著名的生态脆弱带、气候与环境变化敏感带[1]。其中北部沙带位于海拉尔河沿岸，是呼伦贝尔沙地最长的一条沙带，东西长约90 km，以固定和半固定沙丘为主，少量流动沙丘分布在海拉尔河南侧。上世纪80年代起，为了促进植被的恢复，政府采取了植树造林、飞播和禁牧等一系列措施，使得沙地在一定程度上得到了固定和恢复。但是，近年来极端气候事件的频繁发生，加之当地过度放牧等人类活动的加剧，导致沙化土地出现了再次蔓延的趋势，这严重制约了该地区的可持续发展。引入具有强抗逆性的灌木是遏制沙地扩张和促进植被生态恢复的关键策略。这些灌木通过其发达的根系固定沙土，有效限制沙地的流动性，同时减少风蚀作用和沙地表面水分的蒸发，通过植物与土壤间的正反馈作用来改善土壤条件，此外，灌木的冠层还能调节林下微气候，截留种子，从而对下层植被的萌发和生长产生积极影响，进而影响整个植物群落的结构和功能[2]。因此，深入研究灌木对下层植被和土壤条件的影响，不仅对揭示沙化草地的恢复机制至关重要，而且对保持区域生态系统的稳定性和提升其生态服务功能也具有显著意义。

小叶锦鸡儿（*Caragana microphylla*）是我国北方干旱和半干旱区防沙治沙过程中常用的豆科灌木，

收稿日期：2024-05-17； **修订日期**：2024-07-31
基金项目：国家自然科学基金项目（31470622）和国家重点研发计划项目（2016YFC05009083）资助
作者简介：朱甜甜（1992-），女，博士研究生，主要从事干旱区植物生理生态研究. E-mail: Zt95272021@163.com
通讯作者：李清河. E-mail: tsinghel@caf.ac.cn.

在抵御风蚀和促进沙地恢复等方面发挥着重要作用。近年来,学者们针对锦鸡儿属造林树种的研究多集中在以立地条件[3]、灌丛斑块大小[4]、平茬处理[5]和围封年限[6]为影响因子探讨其群落结构变化及对草本植被特征的影响。于双等[7]在研究灵武白芨滩不同种植年限柠条林下草本群落演替时表明随着种植年限的增加,柠条林下植被群落逐渐接近近自然固沙植被,王星等[8]研究荒漠草原人工柠条林对冠下草本群落保育作用表明柠条对林下植物,尤其是禾本科植被具有保育作用;包哈森高娃等[9]研究科尔沁沙地不同林龄的人工小叶锦鸡儿平茬后的群落特征表明随着林龄的增加,小叶锦鸡儿难以实现种子更新,继而促进了其进行无性繁殖,平茬后增加了林下植被的生物量,但是没有增加其多样性。由此可见,探究小叶锦鸡儿对林下植被群落的影响对沙地植被恢复和可持续发展意义重大。

然而,小叶锦鸡儿的影响不仅限于地上植被,还深刻地改变了土壤的理化性质。近年来,随着我国沙地植被恢复工程的推进,对西北脆弱生态区荒漠化防治和水土保持中优势灌木作用的研究日益增多。研究表明,灌丛通过冠层效应调节林下微气候以及土壤的温度和湿度,并通过地下生物过程影响土壤养分的空间分布,形成"沃岛效应"[10],从而促进下层植被的生长和发育。这种地上与地下的相互作用推动了植被群落从单一灌木向灌草复合群落的演替[11]。然而,不同植物种类的"沃岛效应"存在差异[12],且这种效应受到环境压力的调节。胁迫梯度假说(Stress-Gradient Hypothesis,SGH)提出,随着生物或非生物胁迫的增加,灌木群落中的促进作用会逐渐增强。也有观点认为,压力与促进作用之间的关系呈现驼峰模型,即在中、高胁迫条件下,促进作用有助于扩展低耐受物种的生态位,但在极端恶劣的环境条件下,促进效应可能会减弱[13]。在呼伦贝尔沙化草地植被恢复的初期,风蚀和沙埋等环境压力较大,随着植被恢复的深入,这些压力逐渐减小。在这一过程中,针对不同恢复阶段中小叶锦鸡儿灌丛对下层植被群落以及土壤物理化学特征及其演变过程的研究还相对缺乏,缺乏系统性的报道。因此,评估小叶锦鸡儿灌丛在环境胁迫和干旱生态系统中促进生态恢复的潜力显得尤为重要。

本研究以呼伦贝尔沙地北部沙带人工引入的小叶锦鸡儿灌丛为研究对象,分别选取立地条件相似的3个沙化草地植被恢复阶段(半固定沙地、固定沙地和沙质草地)样地,对比研究小叶锦鸡儿灌丛内和灌丛外草本植物群落以及土壤理化特征,揭示不同沙地植被恢复阶段小叶锦鸡儿对下层植被的影响。以期为该地区植被恢复以及群落维持机制提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于呼伦贝尔市北部沙带腹地的完工林场(49°13′N,118°27′E,海拔约为617 m),隶属呼伦贝尔市陈巴尔虎旗,是呼伦贝尔沙区草原沙化的典型区域。研究区气候类型属于典型的温带大陆性气候,年平均气温为-0.5 ℃,年无霜期平均为109 d。年平均降水量约为351.3 mm,主要集中在6—8月,年平均蒸发量1385.8 mm,平均日照时数达1414 h。

研究区为防止沙地进一步恶化蔓延,自2005年起,连续每年进行飞播,并于2005—2015年连续种植小叶锦鸡儿灌丛来固定沙地,促进了该区域流动沙地的固定,并加速了植被演替。现如今,该区域沙地得到了不同程度的恢复,形成了由半固定沙地(植被盖度15%~40%)、固定沙地(植被盖度40%~70%)和沙质草地(植被盖度>70%)镶嵌分布的植被格局。其中,半固定沙地,灌丛稀疏,地表裸露较多,地表无生物结皮,草本主要以一、二年生沙生植物为主;固定沙地阶段,地表偶有片状流沙出现,沙生植物为伴生种;沙质草地阶段,灌丛下层植被盖度较高,无沙化现象发生。

研究区植被主要以固沙灌木和下层草本植被为主,常见灌木包括小叶锦鸡儿(*C. microphylla*)、羊柴(*Hedysarum fruticosum*)和差巴嘎蒿(*Artemisia halodendron*),常见的草本物种有大果虫实(*Corispermum maorocarpum*)、冷蒿(*Artemisia frigida*)、达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)、海拉尔棘豆(*Oxytropis hailarensis*)和披碱草(*Elymus dahuricus*)等。

1.2 试验设计与野外调查

2021年生长季末(8月底),在全面踏查的基础上,选择柠条灌丛覆盖的样地,根据沙化草地植被恢复程度,在研究区内选择半固定沙地(Semi-fixed Sandy,SF)、固定沙地(Fixed-Sandy,FS)和沙质草地(Sandy-Grassland,SG)3个沙化草地植被恢复阶段作为研究对象[11],并完成样品的采集。

每个沙化草地植被恢复类型各设置3个面积为20 m×20 m的样地（样地间隔20~50 m），在每个样地内随机选择5个大小相似的小叶锦鸡儿灌丛（表1），共计15株，林下植被盖度采用针刺法测定，所选柠条冠层间距离>3 m。在每个灌木树冠范围内放置1 m×1 m的正方形样框，同时在树冠外（距离灌木边缘至少1 m）划定相同大小的草本植物样方，每个沙地固定阶段设置30个样方，共计90个样方。调查各样方框内植物种类、数量和高度，并收集地上生物量，带回实验室，105 ℃杀青后再72 ℃烘干72 h至恒重称重。同时，随机选取5个小叶锦鸡儿灌丛内和灌丛外的草本样方取样，除去土壤表层覆盖物采集0~10 cm和10~20 cm土壤样品（考虑到林下草本植被根系主要集中在0~20 cm土层以及外业工作量的因素，故选择这两个土层），相同土层混合后四分法丢弃多余土样，将土壤样品均分两份，其中一部分样品利用铝盒收集用来测定含水量，另外一部分带回实验室后阴干并过2 mm筛，用于土壤理化指标的测定。

1.3 样品分析及数据处理

土壤含水量（Soil Water Content，SWC）用传统烘干法测定，土壤粒径分析采用MS2000激光粒度仪-马儿文法，将分析结果按照美国农业部土壤粒级分类标准输出[14]。土壤有机碳（Soil Organic Content，SOC）采用重铬酸钾-浓硫酸外加热法测定，土壤全氮（Total Nitrogen，TN）含量采用全自动凯氏定氮仪测定，土壤全磷（Total Phosphorus，TP）含量采用NaOH熔融－钼锑抗比色法测定，pH值采用电位法测定[15]。

1.4 数据计算与分析

群落物种丰富度，即Patrick物种丰富度指数（R）、群落高度（H），以及Shannon-Wiener多样性指数（Shannon-Wiener指数，H_i）计算如下：

$$R = S \tag{1}$$

$$H = \frac{\sum H_i}{n} \tag{2}$$

$$H_i = -\sum_{i=1}^{S} P_i \ln P_i \tag{3}$$

式中：S为样方内物种总数；H_i为第i个物种的平均高度；P为第i个物种占群落总株数的比例；n为物种数量。

采用R软件和Origin进行数据的统计分析和作图，图中数据为平均值±标准差。采用双因素方差分析（Two-way ANOVA）和三因素方差分析（Three-way ANOVA）对不同沙地固定阶段灌丛内外的植被特征（物种丰富度、Shannon-Wiener指数、群落高度和生物量）和不同土层土壤理化特征（土壤含水量、粒径、有机碳、全氮、全磷和pH值）进行差异性显著分析（α=0.05）。采用最小显著差异法（Least-Significant Difference，LSD）比较不同沙地恢复阶段间的差异，灌丛内外以及不同土层间差异采用T检验（α=0.05）；Pearson相关分析揭示植被特征与土壤理化特征的相关性。利用R软件中的“vegan”和“rdacca.hp”包进行冗余分析（Redundancy Analysis，RDA），量化土壤理化特征对地上植被的贡献率及筛选重要影响因子。

2 结果与分析

2.1 小叶锦鸡儿灌丛对下层植被群落特征的影响

双因素方差分析表明沙化草地不同植被恢复阶段对下层植被群落特征（丰富度、Shannon-Wiener指数、群落高度和生物量）均影响显著（P<0.01），灌丛内外对下层植被丰富度、群落高度和生物量影响显著（P<0.01），交互作用仅对丰富度和生物量影响显著（P<0.01）（表2，图1）。

灌丛下植被的Shannon-Wiener指数、群落高度均随着植被恢复程度的提高不断增加，表现为沙质草地>固定沙地>半固定沙地，而物种丰富度和生物量的最高值出现在固定沙地阶段（图1）。

在3个植被恢复阶段，灌丛内外的丰富度、群落高度和生物量差异显著（P<0.05），Shannon-Wiener

表1 各沙化草地植被恢复阶段选择小叶锦鸡儿灌丛概况

Tab. 1 Changes in selected shrub size and community profiles by sand revegetation stage

恢复阶段	长度/cm	宽度/cm	高度/cm	林下植被盖度/%
半固定沙地	118.5±16.04b	89.70±19.87b	112.13±13.76a	25.2±8.21c
固定沙地	161±23.55a	131.17±23.70a	150.53±41.49a	48.5±10.54b
沙质草地	122.12±22.12b	98.27±27.93b	149.00±36.30b	83.5±4.57a

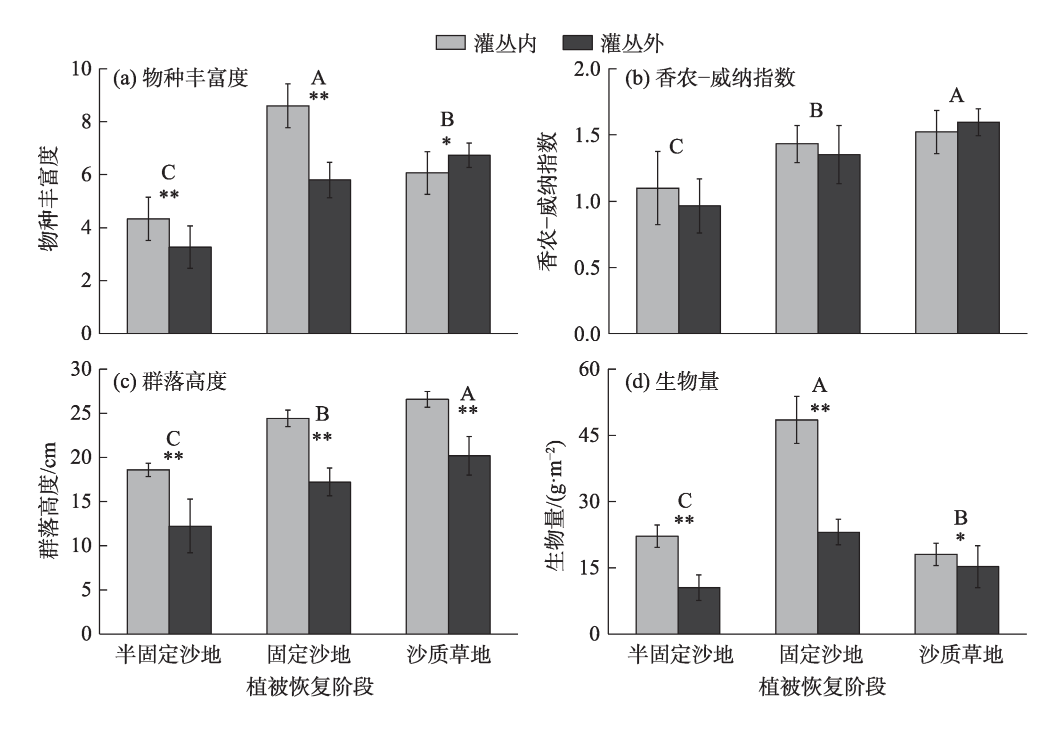
注：同列不同字母表示差异显著（P<0.05）；N=15。

表2 植被恢复阶段和灌丛内外对植被特征的双因素方差分析

Tab. 2 Results of two-way ANOVA for the effects of revegetation stages and inside and outside shrubs on vegetation characteristics

因素	*df*	丰富度		香农-威纳指数		群落高度		生物量	
		F	*P*	*F*	*P*	*F*	*P*	*F*	*P*
恢复阶段	2	172.61	<0.01	58.49	<0.001	159.35	<0.01	277.37	<0.01
灌丛内外	1	46.61	<0.01	1.34	0.25	319.62	<0.01	295.08	<0.01
恢复阶段×灌丛内外	2	41.03	<0.01	2.36	0.10	0.58	0.56	72.48	<0.01

注：表中*df*为自由度，*F*为组间均值存在显著差异，*P*<0.05表示统计学显著。下同。



注：不同大写字母表示灌丛内外不同沙地植被恢复阶段差异显著（*P*<0.05）；*表示相同沙地植被恢复阶段灌丛内外差异显著，*为*P*<0.05，**为*P*<0.01。

图1 不同植被恢复阶段小叶锦鸡儿灌丛内外植被群落特征变化

Fig. 1 Changes in vegetation community characteristics under and outside the *C. micrrophylla* at different stages of revegetation

指数差异不显著。在半固定沙地和固定沙地阶段，灌丛内植被物种丰富度高于灌丛外（*P*<0.01），分别增加了30.1%和48.2%，而沙质草地阶段，则表现为灌丛外（6.73）显著高于灌丛内（6.07）（*P*<0.05）；在3个植被恢复阶段，灌丛内的群落高度和生物量均高于灌丛外（*P*<0.05），其中群落高度分别比灌丛外增加了51.2%、42.0%和31.6%，生物量分别比灌丛外增加了110.7%、110.1%和18.0%。

2.2 小叶锦鸡儿灌丛对土壤理化特征的影响

2.2.1 土壤物理特性 三因素方差分析结果表明沙化草地植被恢复阶段、灌丛内外和土层均显著影响土壤含水量和粒径组成（*P*<0.01），恢复阶段与灌丛内外的交互作用显著影响土壤粒径的组成（*P*<0.01），灌丛内外和土层的交互作用显著影响土壤粉粒（*P*<0.01）和沙粒（*P*<0.05）含量，三个因素的交互作用显著影响土壤粉粒含量（*P*<0.05）（表3，图2）。

在2个土层中，随着植被恢复程度的增加，土壤含水量呈现逐渐增加的趋势，最高值在沙质草地阶段，为1.2%。各植被恢复阶段土壤含水量均表现为灌丛内高于灌丛外（*P*<0.05），分别增加了96.6%、28.4%和44.7%（图2a1~图2b2）。

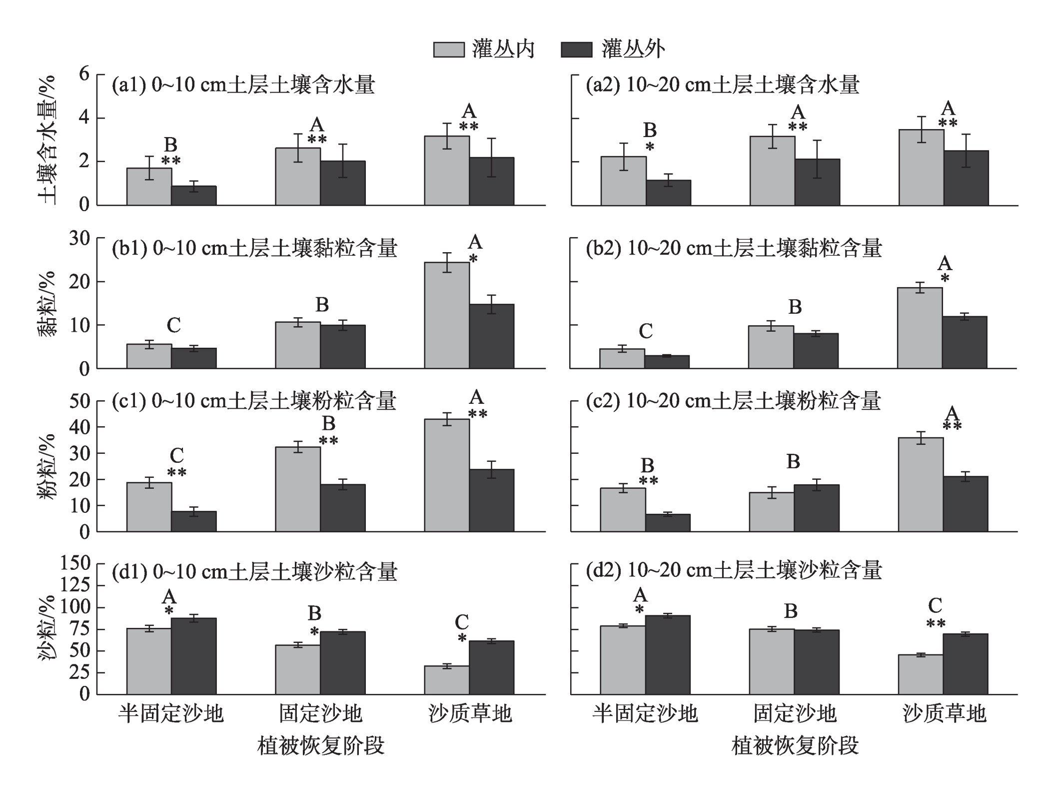
10~20 cm土壤含水率均高于0~10 cm土层，其中半固定沙地阶段灌丛内外与固定沙地灌丛内的不同土层差异显著（*P*<0.05）。

在2个土层中，黏粒和粉粒表现为随沙地植被恢复程度的增加而增加，其中沙质草地阶段含量最

表3 植被恢复阶段、灌丛内外和土层对土壤物理特征的三因素方差分析结果

Tab. 3 The results of three-way ANOVA results of soil physical properties at different stages of revegetation, inside and outside shrubs, and soil layers

因素	*df*	土壤含水率		黏粒		粉粒		沙粒	
		F	*P*	*F*	*P*	*F*	*P*	*F*	*P*
恢复阶段	2	71.58	<0.01	87.24	<0.01	66.97	<0.01	132.85	<0.01
灌丛内外	1	91.83	<0.01	19.19	<0.01	71.96	<0.01	93.75	<0.01
土层	1	13.91	<0.01	8.39	<0.01	15.17	<0.01	25.77	<0.01
恢复阶段×灌丛内外	2	0.29	0.74	8.02	<0.01	6.27	<0.01	14.12	<0.01
恢复阶段×土层	2	1.40	0.25	1.46	0.24	2.56	0.08	2.46	0.09
灌丛内外×土层	1	0.13	0.72	0.06	0.81	8.39	<0.01	5.24	<0.05
恢复阶段×灌丛内外×土层	2	1.61	0.20	0.64	0.53	3.54	<0.05	2.31	0.10



注:不同大写字母表示同一土层、同一灌丛内外不同植被恢复阶段差异显著;*表示同一植被恢复阶段、同一土层灌丛内外差异显著,*为 $P<0.05$,**为 $P<0.01$。下同。

图2 不同植被恢复阶段灌丛内外土壤含水率和粒径组成变化

Fig. 2 Changes in soil water content and particle size distribution within and outside shrubs at different vegetation restoration stages

高,黏粒含量平均为21.0%,粉粒含量平均为39.0%;沙粒含量则逐渐减少,其中半固定沙地沙粒含量最高,为77.0%(图2b1~图2d2)。

在2个土层中,灌丛内和灌丛外的黏粒和粉粒含量在沙质草地阶段差异显著($P<0.05$),表现为灌丛内高于灌丛外,而沙粒占比则表现为灌丛外高于灌丛内($P<0.05$)。

2.2.2 土壤化学特征 三因素方差分析结果表明,植被恢复阶段、灌丛内外和土层分别对土壤有机碳、全氮和pH值影响显著($P<0.05$),植被恢复阶段和灌丛内外对土壤全磷影响不显著,土层对土壤全磷有显著影响($P<0.01$)。恢复阶段和灌丛内外的交互作用对有机碳、全磷和pH有显著影响($P<0.05$),恢复阶段和土层的交互作用对全氮和全磷有显著影响($P<0.05$),三个因素的交互作用对全氮和全磷有显著影响($P<0.05$)(表4,图3)。

不同植被恢复阶段,土壤有机碳差异显著($P<0.05$)。随着植被恢复程度的增加,土壤有机碳逐渐

增加,最高值在沙质草地阶段,为4.12 g·kg^{-1}。此外,土壤有机碳均表现为灌丛内高于灌丛外,其中在半固定沙地和固定沙地阶段灌丛内分别比灌丛外增加了56.5%和93.9%,但是在沙质草地阶段二者差异不显著(图3a1,图3a2)。

在2个土层中,不同植被恢复阶段,土壤全氮从半固定沙地到固定沙地阶段均显著增加($P<0.05$),其中0~10 cm土层增加了73.0%,10~20 cm土层增加了20.5%。土壤全氮表现为灌丛内高于灌丛外,其中0~10 cm土层增加了60.0%,10~20 cm土层增加了64.0%。不同植被恢复阶段土壤pH差异显著($P<0.05$),且随着植被恢复程度的增加,灌丛内土壤pH减小(图3b1~图3b2,图3d1~图3d2)。

2.3 小叶锦鸡儿灌丛土壤理化特征与植被特征相关性

Pearson相关分析表明,在0~10 cm土层中(图4a),植被生物量与土壤含水量、粉粒含量、土壤有机碳和全氮含量呈现显著或极显著正相关关系($P<0.05$)。植被群落高度与土壤含水量、黏粒和粉粒含量、土壤有机碳和全氮含量呈现显著相关($P<0.01$),

表4 植被恢复阶段、灌丛内外和土层对土壤化学特征的三因素方差分析结果

Tab. 4 Three-way ANOVA results of soil chemical characteristics at different stages of revegetation, inside, outside shrubs and soil layers

因素	*df*	有机碳		全氮		全磷		pH	
		F	*P*	*F*	*P*	*F*	*P*	*F*	*P*
恢复阶段	2	59.029	<0.01	23.535	<0.01	1.89	0.15	48.28	<0.01
灌丛内外	1	15.829	<0.01	133.738	<0.01	0.07	0.79	48.08	<0.01
土层	1	6.135	<0.05	5.503	<0.05	7.83	<0.01	6.465	<0.05
恢复阶段×灌丛内外	2	3.581	<0.05	2.454	0.09	18.53	<0.01	50.64	<0.01
恢复阶段×土层	2	1.090	0.34	7.525	<0.01	3.11	<0.05	2.204	0.11
灌丛内外×土层	1	0.964	0.33	0.009	0.93	1.77	0.19	1.746	0.19
恢复阶段×灌丛内外×土层	2	0.353	0.70	19.987	<0.01	3.077	<0.05	1.898	0.15

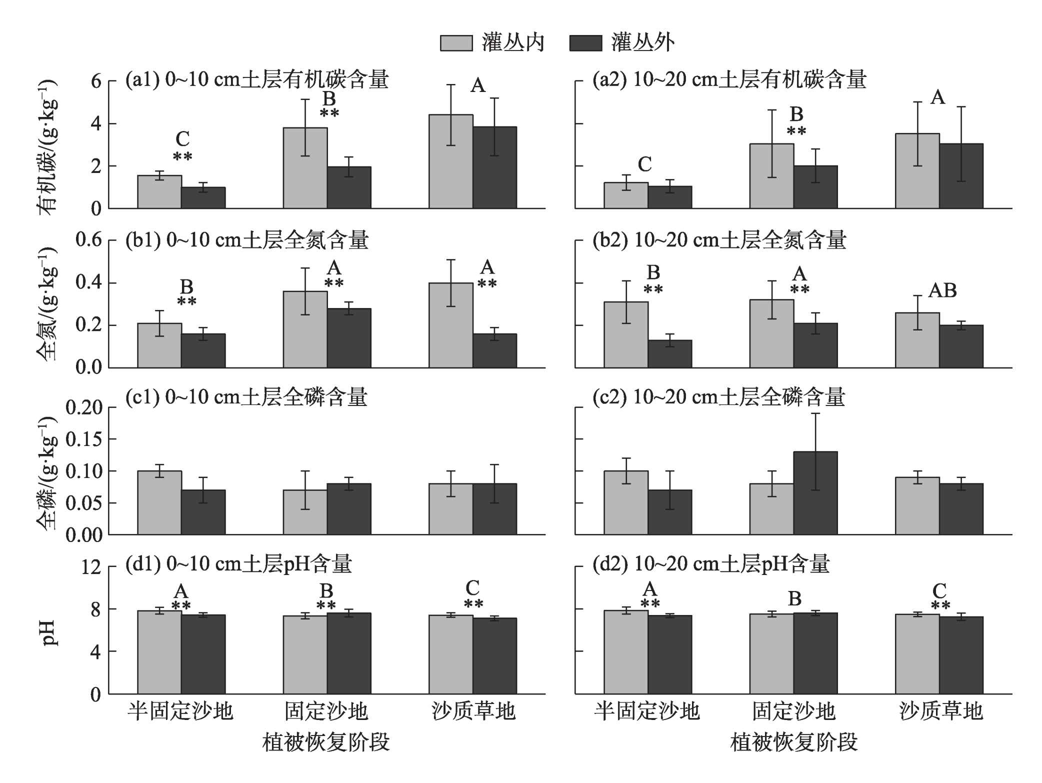


图3 不同植被恢复阶段灌丛内外土壤化学特征变化

Fig. 3 Changes in soil chemical characteristics within and outside shrubs at different vegetation restoration stages

植被群落高度与沙粒含量呈现极显著负相关关系($P<0.01$)。植被Shannon-Wiener指数和丰富度指数均与土壤黏粒和粉粒含量以及土壤有机碳和全氮含量呈现显著正相关关系($P<0.01$)，与土壤沙粒含量和土壤pH值呈现极显著负相关关系($P<0.01$)。

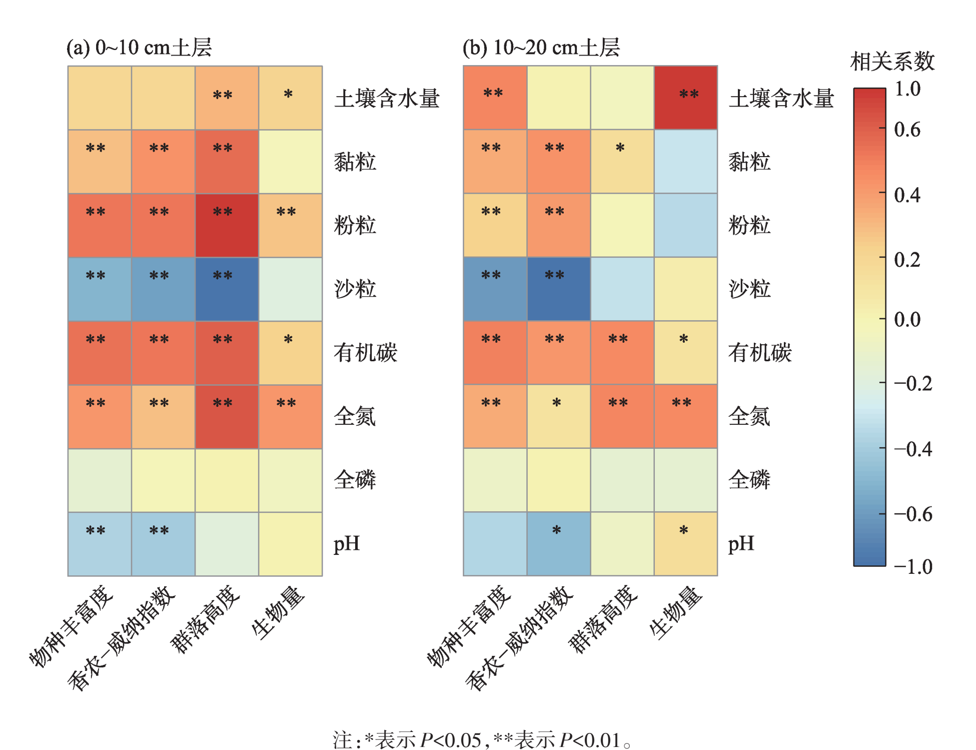
在10~20 cm土层中(图4b)，植被生物量与土壤含水量、有机碳、全氮和pH呈现显著正相关关系($P<0.05$)；群落高度与土壤黏粒含量、有机碳和全氮呈现显著正相关关系($P<0.05$)；植被Shannon-Wiener指数与土壤黏粒和粉粒含量、有机碳和全氮呈现显著正相关关系($P<0.05$)，而与土壤沙粒含量和pH呈现显著负相关关系($P<0.05$)；物种丰富度与土壤含水率、黏粒、粉粒含量有机碳和全氮呈现显著正相关关系($P<0.01$)，与土壤沙粒含量呈现显著负相关关系($P<0.01$)。

冗余分析结果显示，在0~10 cm土层，土壤理化特征解释了灌丛内外植被变化的59.6%(图5a1，RDA1：47.5%，RDA2：12.1%)。前两轴能够准确地反映植被特征和各土壤环境因子之间的关系，其中土壤粒径含量和全氮是显著影响地上植被群落特征变化的关键因子(图5a2)。在10~20 cm土层，土壤理化特征解释了灌丛内外植被变化的46.9%(图5b1，RDA1：37.7%，RDA2：9.2%)，其中土壤含水量、全氮和土壤有机碳是显著影响地上植被群落特征变化的关键因子(图5b2)。

3 讨论

3.1 小叶锦鸡儿灌丛在沙化草地植被恢复中的作用

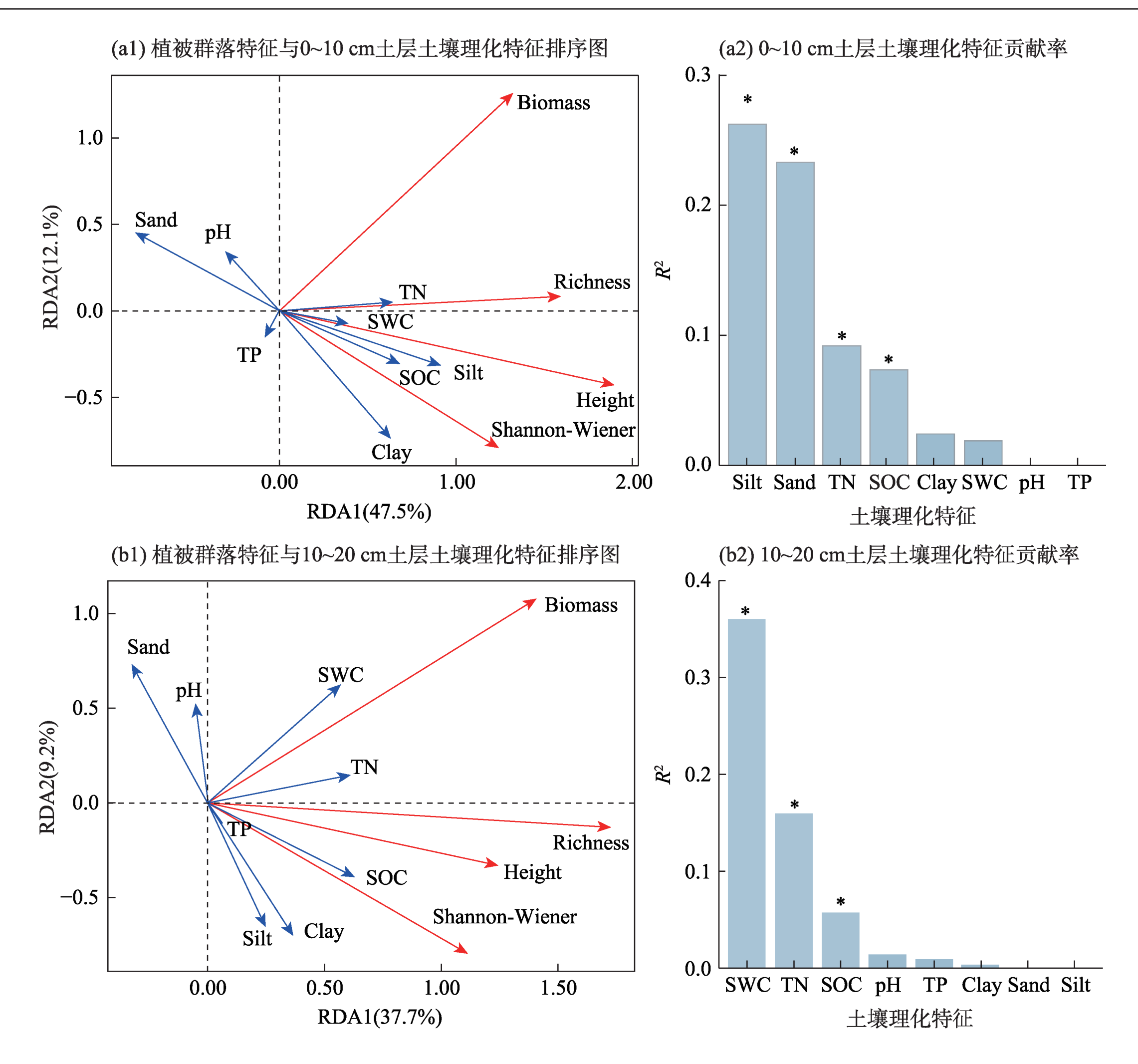
灌丛促进植被恢复作用的发生主要是依靠冠层效应和土壤改良[16-17]。本研究表明在不同沙化草地植被恢复阶段，小叶锦鸡儿灌丛内植被群落高度和生物量大于灌丛外，而物种丰富度和Shannon-Wiener指数在半固定沙地和固定沙地阶段表现为灌丛内大于灌丛外，在沙质草地阶段则表现为灌丛外大于灌丛内，这与王星等[8]学者的研究结果一致。在沙地植被恢复过程中，冠层作为屏障，不仅可以截留空气中的种子，还可以缓冲沙埋带来的干扰，减少极端太阳辐射和土壤蒸发，为灌丛内种子萌发和建成提供适宜的环境[18]，这就解释了在本研究结果中植被恢复初期灌丛内植被的物种丰富度、高度和生物量都显著高于灌丛外的原因。而在沙质草地阶段，随着小叶锦鸡儿灌丛林龄的增加，冠幅增大，强烈的遮光导致灌丛内植被光合作用受阻，同时灌丛内不同生存策略植被种间竞争加剧，因此沙地稳定后期灌丛外的物种丰富度和多样性较高，并



注：*表示$P<0.05$，**表示$P<0.01$。

图4　植被特征与土壤理化特征的相关分析

Fig. 4　Correlation coefficients between soil factors and vegetation characteristics



注:红色箭头线表示植被特征,蓝色箭头线表示土壤理化特征;*表示 $P<0.05$;SOC为土壤有机碳,TN为全氮,TP为全磷,Sand为沙粒,Silt为粉粒,Clay为黏粒,SWC为土壤含水量,Richness为物种丰富度,Height为群落高度,Shannon-Wiener为香农-威纳指数,Biomass为生物量。

图5 植被特征与土壤理化特征冗余分析排序及土壤理化特征贡献率

Fig. 5 Redundancy analysis ranking of vegetation characteristics and soil physicochemical characteristics, and contribution rate of soil physicochemical characteristics

且灌丛内植被生物量显著低于固定沙地时期。胁迫梯度假说(SGH)认为环境胁迫增加,物种间的正相互作用增加[19],在本研究结果中,从灌丛内物种丰富度和Shannon-Wiener指数来看,半固定沙地和固定沙地阶段,灌丛存在促进作用,而在沙质草地阶段则相反,这与SGH预测不同,相关研究表明,正相互作用会随着环境压力的改变而改变,当环境压力减小时,灌丛与灌丛内物种会呈现出负相关关系[13],这解释了本研究中出现的现象,在沙质草地阶段,灌丛外的物种丰富度和Shannon-Wiener指数高于灌丛内。

本研究中,小叶锦鸡儿灌丛内的土壤含水量和黏粒含量均高于灌丛外,且二者含量均随着植被恢复程度的增强而增加,这表明小叶锦鸡儿灌丛能够减少土壤水分损失,并分解土壤粗颗粒,使得大颗粒沙土向细颗粒发展,即小叶锦鸡儿灌丛改变了土壤粒径的占比,这与李尝君等[20]的研究结果一致,在沙化草地植被恢复中,灌木不仅能缓冲表层土壤的风蚀侵害,还能够截留沙尘,从而导致土壤粒径的改变。此外,本研究中随着植被恢复程度的增加土壤有机碳增加,小叶锦鸡儿灌丛内土壤有机碳和全氮含量高于灌丛外。小叶锦鸡儿作为豆科灌木,除了凋落物加速土壤有机碳积累外,根部大量根瘤菌,可以固定空气中的游离态氮,从而增加土壤氮含量[21]。此外,还可以将固定氮转移到邻近植物中,进而影响群落的组成和结构[22]。本研究中,土

壤磷在不同沙地植被恢复阶段和灌丛内外没有显著差异,这是因为磷元素在土壤中以沉积矿物的形式存在,其迁移能力相对较弱。因此,土壤中的全磷含量主要受制于土壤母质的初始条件[23]。Erfanzadeh等[24]分析不同种灌木对土壤特征影响时表明,灌木的"沃岛效应"使得养分积累是普遍存在的现象,灌木和草本植物的凋落物的增加为C和N的积累提供了机会。此外,小叶锦鸡儿灌丛微生物固氮作用和大量根系微生物的存在[25],使得其根际土壤的养分高于根区外土壤,结合其强大的根系,保证了小叶锦鸡儿灌丛在恶劣环境中生长。由此可见,群落植被恢复进程与土壤理化特征变化紧密相关。

3.2 土壤因子对植被恢复的作用

一直以来,植被-土壤协同和反馈被认为是以冠层为主导的灌丛促进沙化草地植被群落恢复演替的关键[26],也是沙地生态系统植被恢复演替的重要研究内容。本研究结果表明土壤物理特征和化学特征与植被特征的变化具有显著相关性,并且在0~10 cm土层,土壤粒径含量和全氮是影响地上植被变化的主要驱动因子,而在10~20 cm土层,土壤含水量、全氮和土壤有机碳是显著影响地上植被群落特征变化的关键因子。这说明,小叶锦鸡儿对土壤粒径的改变主要在土壤表层,相比于10~20 cm的土壤,0~10 cm土壤的化学特征变化对植被变化的影响较小,而10~20 cm土壤的含水量、全氮和有机碳是影响植被变化的关键因子。有学者认为,植物之间相互作用的结果与地上和地下生态过程密切相关,植被的生长和发育是土壤特性改变的重要驱动力[27-28],其中树干径流和凋落物沉积被认为是优势灌木为下层植被提供C、N和其他微量元素等营养物质的主要来源[29],本研究中小叶锦鸡儿作为豆科灌木,大量根瘤菌以及"氮转移"强烈影响着地上植被的格局和分布[22]。有相关研究表明,植物可以改变包括土壤碳、氮以及pH等土壤化学特征,反过来,又可以影响植被的生长和分布[30]。本研究中小叶锦鸡儿灌丛通过吸收和释放土壤中的养分,参与土壤的物质循环从而改变了土壤化学特征,同时利用冠层来降低风速、截留沙尘和有机质,使得土壤表层的颗粒度减小从而影响土壤物理特征,这一系列过程形成了反馈通路,完成了地上植被对土壤养分的"输送"过程[27]。

相关性分析和冗余分析结果均表明土壤全氮和有机碳与植被特征的变化关系紧密并且是影响其变化的主要因子,这也就是说土壤有机碳和全氮是影响地上植被生长和发育的关键因素,这可能与草本植物在土壤浅层密集的根系活动有关,植被对土壤完成了"输送"后促进了土壤有机碳和全氮的形成和积累,随着土壤营养物质含量的提升,也为地上植被的生长和发育创造了有利条件[30]。有学者在干旱和半干旱生态系统中的研究表明,灌木或者多年生禾草能够改变土壤碳的分布,增加了土壤碳分布的空间异质性,且土壤中的C、N、P含量不仅对植物叶片中的C、N、P产生直接影响,更有很多间接影响[31]。由此可见,地上植被的恢复过程与这种相互依赖的植被-土壤循环关系密切,这也从一方面印证了本研究结果。此外,刘燕萍等[32]研究表明,在黄土丘陵沟壑区,土壤含水量、表层化学性质和柠条灌丛内草本生物量和多样性的变化有较大的相关性;刘任涛等[33]在针对荒漠草原区柠条灌丛的研究认为,在柠条生长期间,林地土壤质地、容重、土壤有机碳、全N、全P与pH值是改变对草本植被数量特征的主要因子。王明明等[34]在对科尔沁沙地封育恢复过程的研究中表明,不同的沙地群落物种受到不同的土壤因子影响,其中沙质草地中的群落物种与土壤养分有强相关性,固定沙地与土壤水分关系较大,而流动沙地则与土壤因子相关性不大。这些结果与本研究结果相同,都表明优势灌木是通过灌木-土壤相互作用来促进灌丛内植被群落发展演替。

在沙地植被恢复过程中,水分是影响植被演替的重要因素。在沙化草地植被恢复初期,优势灌木利用冠层和土壤效应促进土壤结皮形成和发展,阻碍表层土壤水分蒸发,使得灌木灌丛内土壤水分呈现浅层化,从而加速浅根系草本植物的生长。然而,在植被恢复后期,由于深根系的灌木得不到水分出现退化从而促进了草本植被的发展演替[35]。在本研究中,只针对0~20 cm土层的理化性质进行了采样研究,虽然结果表明10~20 cm的土壤含水率比0~10 cm土层对植被变化影响更大,但是也不足以说明浅层和表层土壤性质的差异,未来还需进一步挖掘更深土层理化性质的变化对地上植被的影响,以明确不同植被恢复阶段限制植被生长的重要机制。

4 结 论

种植小叶锦鸡儿灌丛是防止沙化蔓延和加速沙化草地植被恢复演替的有效措施。在植被恢复过程中,小叶锦鸡儿灌丛能提高灌丛内植被群落的生物量、高度和丰富度,尤其在半固定和固定沙地阶段。同时,还能提升土壤的含水量和黏粒含量,降低沙粒含量。随着恢复进程,土壤的含水量、黏粉粒、有机碳和全氮含量均有所增加,尤其在灌丛下更为显著,而全磷含量变化不大。在0~10 cm土层,土壤粒径和全氮是地上植被变化的主要因素,土壤含水量、全氮和有机碳在10~20 cm土层对植被群落特征的影响更为关键。因此,小叶锦鸡儿灌丛通过改善土壤理化特征从而增加了植被的物种丰富度、高度和生物量,对沙地植被恢复具有促进作用,是沙地植被恢复演替的重要驱动力。

参考文献(References):

[1] 裘善文. 中国东北西部沙地与沙漠化[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 7-36. [Qiu Shanwen. Sand Lands and Desertification in Western Northeast China[M]. Beijing: Science Press, 2008: 7-36.]

[2] 魏志刚, 李永峰, 张百惠, 等. 恢复生态学原理与应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2012: 53-67. [Wei Zhigang, Li Yongfeng, Zhang Baihui, et al. Principles and Applications of Restoration Ecology[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2012: 53-67.]

[3] 王子婷, 杨磊, 李广, 等. 半干旱黄土丘陵区微地形变化对人工柠条林草本分布的影响[J]. 草地学报, 2021, 29(2): 364-373. [Wang Ziting, Yang Lei, Li Guang, et al. Effects of microtopography variation on the distribution of herbaceous vegetation of *Caragana korshinskii* plantations in the semi-arid loess hilly region[J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(2): 364-373.]

[4] 张敬敏, 珠娜, 蔡育蓉, 等. 小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)灌丛对草本群落特征的影响[J]. 生态学报, 2023, 43(21): 8830-8839. [Zhang Jingmin, Zhu Na, Cai Yurong, et al. Effects of *Caragana microphylla* on herbaceous community characteristics[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(21): 8830-8839.

[5] 丁新峰, 郝广, 董轲, 等. 平茬处理对小叶锦鸡儿灌丛邻居植物群落空间格局的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(11): 4011-4020 [Ding Xinfeng, Hao Guang, Dong Ke, et al. Effects of pruning *Caragana microphylla* shrubs on the spatial distribution patterns of neighbouring plant communities[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(11): 4011-4020.]

[6] 董轲, 丁新峰, 郝广, 等. 围封年限对内蒙古灌丛化草原小叶锦鸡儿灌丛结构及群落种间关联的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(14): 5775-5781. [Dong Ke, Ding Xinfeng, Hao Guang, et al. Effects of enclosure period on population structure of *Caragana microphylla* and interspecific associations in the Inner Mongolia shrub-encroches grasslands[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(14): 5775-5781.]

[7] 于双, 李小伟, 王瑞霞, 等. 灵武白芨滩不同年限柠条固沙林林下草本群落演替规律及机制[J]. 草业学报, 2024, 33(3): 13-23. [Yu Shuang, Li Xiaowei, Wang Ruixia, et al. Succession mechanism and dynamics in artificial *Caragana korshinskii* sand-fixing forests of different ages in Baijitan of Lingwu[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2024, 33(3): 13-23.]

[8] 王星, 宋珂辰, 许冬梅, 等. 荒漠草原人工柠条林对冠下草本植物群落的保育作用[J]. 生态学报, 2022, 42(18): 7372-7380. [Wang Xing, Song Kechen, Xu Dongmei, et al. Nurse effects of artificial forest of *Caragana intermedia* on herbaceous plant communities under its canopies in desert steppe[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(18): 7372-7380.]

[9] 包哈森高娃, 阿拉坦花, 丰洁, 等. 科尔沁沙地不同林龄小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)人工林群落特征及平茬抚育后状况[J]. 中国沙漠, 2015, 35(6): 1527-1531. [Bao Hasengaowa, Alatanhua, Feng Jie, et al. Population traits of planted *Caragana microphylla* of different ages and its growth after cutting in the Horqin Sandy Land[J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(6): 1527-1531.]

[10] 张振杰, 于露, 王红梅. 荒漠草原向灌丛转变过程两种优势植物定植土壤水分阈值特征[J]. 生态学报, 2022, 42(19): 8061-8072. [Zhang Zhenjie, Yu Lu, Wang Hongmei. Characteristics of soil moisture threshold for the seedling establishment of two dominant plants in the desert grassland-shrubland transition[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(19): 8061-8072.]

[11] Bai Y X, She W W, Michalet R, et al. Benefactor facilitation and beneficiary feedback effects drive shrub-dominated community succession in a semi-arid dune ecosystem[J]. Applied Vegetation Science, 2018, 21: 595-606.

[12] 刘小龙, 胡健, 周青平, 等. 若尔盖高原典型草地灌丛化对植被特征和土壤养分的影响[J]. 草地学报, 2022, 30(4): 901-908. [Liu Xiaolong, Hu Jian, Zhou Qingping, et al. Effects of typical shrub-encroched grassland on vegetation characteristics and soil nutrients in the Zoige Plateau[J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(4): 901-908.]

[13] Maestre F T, Callaway R M, Valladares F, et al. Refining the stress-gradient hypothesis for competition and facilitation in plant communities[J]. Journal of Ecology, 2009, 97(2): 199-205.

[14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. [Bao Shidan. Soil and Agricultural Chemistry Analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.]

[15] 吴克宁, 赵瑞. 土壤质地分类及其在我国应用探讨[J]. 土壤学报, 2019, 56(1): 227-241. [Wu Kening, Zhao Rui. Soil texture classification and its application in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(1): 227-241.]

[16] Zhao H L, Guo Y R, Zhou R L, et al. The effects of plantation development on biological soil crust and topsoil properties in a desert in Northern China[J]. Geoderma, 2011, 160: 367-372.

[17] 瞿王龙, 杨小鹏, 张存涛, 等. 干旱、半干旱地区天然草原灌木及其肥岛效应研究进展[J]. 草业学报, 2015, 24(4): 201-207. [Qu Wanglong, Yang Xiaopeng, Zhang Cuntao, et al. Shrub-mediated "fertile island" effects in arid and semi-arid grassland[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2015, 24(4): 201-207.]

[18] 崔光帅, 罗天祥, 梁尔源, 等. 干旱半干旱区冠层对草本植物的促进作用研究进展[J]. 植物生态学报, 2022, 46: 1-13. [Cui Guangshuai, Luo Tianxiang, Liang Eryuan, et al. Advances in the study of shrub facilitation on herbs in arid and semi-arid regions [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2022, 46: 1-13.]

[19] He Q, Bertness M D, Altieri A H. Global shifts towards positive species interactions with increasing environmental stress[J]. Ecology Letters, 2013, 16(5): 695-706.

[20] 李尝君, 曾凡江, 郭京衡, 等. 植被恢复程度与沙地土壤性质—以塔克拉玛干沙漠南缘为例[J]. 干旱区研究, 2015, 32(6): 1061-1067. [Li Changjun, Zeng Fanjiang, Guo Jingheng, et al. Soil properties of different sandy lands under different vegetation recovering levels[J]. Arid Zone Research, 2015, 32(6): 1061-1067.]

[21] 苏永中, 赵哈林, 张铜会. 几种灌木、半灌木对沙地土壤肥力影响机制的研究[J]. 应用生态学报, 2003, 13(7): 802-806. [Su Yongzhong, Zhao Halin, Zhang Tonghui. Influencing mechanism of several shrubs and subshrubs on soil fertility in Keerqin sandy land[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 13(7): 802-806.]

[22] Ouyang S, Tian Y, Liu Q, et al. Symbiotic nitrogen fixation and interspecific transfer by *Caragana microphylla* in a temperate grassland with 15N dilution technique[J]. Applied Soil Ecology, 2016, 108: 221-227.

[23] 李明, 秦洁, 红雨, 等. 氮素添加对贝加尔针茅草原土壤团聚体碳、氮和磷生态化学计量学特征的影响[J]. 草业学报, 2019, 28(12): 29-40. [Li Ming, Qin Jie, Hong Yu, et al. Effects of nitrogen addition on ecological stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in *Stipa baicalensis* grassland soil aggregates[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2019, 28(12): 29-40.]

[24] Erfanzadeh R, Yazdani M, Arani A M. Effect of different shrub species on their sub-canopy soil and vegetation properties in semiarid regions[J]. Land Degradation & Development, 2021, 32(11): 3236-3247.

[25] 马全林, 张锦春, 陈芳, 等. 腾格里沙漠南缘花棒(*Hedysarum scoparium*)人工固沙林演替规律与机制 [J]. 中国沙漠, 2020, 40(4): 206-215. [Ma Quanlin, Zhang Jinchun, Chen Fang, et al. Mechanism and dynamics for succession of artificial *Hedysarum scoparium* sand-binding forests at the southern edge of Tengger Desert[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(4): 206-215.]

[26] Liu Liang, Bai Yuxuan, She Weiwei. A nurse shrub species helps associated herbaceous plants by preventing shade-induced evaporation in a desert ecosystem[J]. Land Degradation and Development, 2021, 32(4): 1796-1808.

[27] Michalet R, Brooker R W, Lortie C J, et al. Disentangling direct and indirect effects of a legume shrub on its understorey community[J]. Oikos, 2015, 124(9): 1251-1262.

[28] 唐蛟, 殷金忠, 潘飞飞, 等. 生态恢复中灌丛保育效应研究进展[J]. 应用生态学报, 2022, 33(8): 2279-2285. [Tang Jiao, Yin Jinzhong, Pan Feifei, et al. Research progress on nurse effects of shrubs in ecological restoration[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(8): 2279-2285.]

[29] 龚世豪, 查同刚, 张晓霞, 等. 晋西黄土区典型林分凋落物-土壤养分对降雨再分配变化的响应[J]. 生态学报, 2024, 44(7): 1-12. [Gong Shihao, Zha Tonggang, Zhang Xiaoxia, et al. Response of litter-soil nutrients to rainfall redistribution in typical stand forest stand on loess area of western Shanxi Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(7): 1-12.]

[30] 周阳, 姜丽丽, 李博文, 等. 植物—土壤反馈研究进展[J]. 广西植物, 2017, 37(11): 1480-1488. [Zhou Yang, Jiang Lili, Li Bowen, et al. Advances in plant and soil feedback [J]. Guangxi Plants, 2017, 37(11): 1480-1488.]

[31] 王国华, 王佳琪, 刘婧. 晋西北丘陵风沙区柠条锦鸡儿人工林植被和土壤随林龄变化特征[J]. 应用生态学报, 2024, 35(1): 62-72. [Wang Guohua, Wang Jiaqi, Liu Jing. Characteristics of vegetation and soil in *Caragana korshinskii* in the hilly and sandy areas of northwestern Shanxi Province, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(1): 62-72.]

[32] 刘燕萍, 马驰, 莫保儒, 等. 柠条人工林下草本植被特征与土壤特性相关性研究[J]. 草地学报, 2020, 28(2): 468-473. [Liu Yanping, Ma Chi, Mo Baoru, et al. Relationship between herbaceous vegetation characteristics and soil characteristics under *Caragana plantation*[J]. Acta Agrestia Sinica, 2020, 28(2): 468-473.]

[33] 刘任涛, 柴永青, 徐坤, 等. 荒漠草原区柠条人工固沙林生长过程中地表植被-土壤的变化[J]. 应用生态学报, 2012, 23(11) : 2955-2960. [Liu Rentao, Chai Yongqing, Xu Kun, et al. Variations of ground vegetation and soil properties during the growth process of artificial sand-fixing *Caragana intermedia* plantations in desert steppe[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(11): 2955-2960.]

[34] 王明明, 刘新平, 何玉惠, 等. 科尔沁沙地封育恢复过程中植物群落特征变化及影响因素[J]. 植物生态学报, 2019, 43(8): 672-684. [Wang Mingming, Liu Xinping, He Yuhui, et al. How enclosure influences restored plant community changes of different initial types in Horqin Sandy Land[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2019, 43(8): 672-684.]

[35] Bai Y X, She W W, Miao L, et al. Soil microbial interactions modulate the effect of *Artemisia ordosica* on herbaceous species in a desert ecosystem, northern China[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2020, 150: 108013.

Effects of *Caragana microphylla* on vegetation and soil in the restoration of desertified grasslands

ZHU Tiantian[1], HAI Lu[2], CAO Wenxu[1], LI Xu[1], LI Qinghe[1]

(1. Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation of National Forestry and Grassland Administration, State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Experimental Center of Desert Forestry, Chinese Academy of Forestry, Dengkou 015200, Inner Mongolia, China)

Abstract: *Caragana microphylla*, a shrub species commonly used to promote vegetation recovery in grasslands affected by desertification, plays a significant role in the ecological restoration and sustainable development of sandy lands. Understanding its impact on understory vegetation and soil physicochemical characteristics during different stages of desertified grassland recovery is crucial. This study focuses on *C. microphylla* shrublands in three typical stages of desertified grassland vegetation recovery in the Hulun Buir sandy land: semi-fixed, fixed, and sandy grasslands. This study used ANOVA, Pearson's correlation analysis, and redundancy analysis methods to explore the changes in understory plant communities and soil physicochemical characteristics in *C. microphylla* shrublands during different stages of desertified grassland vegetation recovery and their interrelationships. The results indicate that, as the degree of vegetation recovery in desertified grasslands increases, the species richness of the understory vegetation, Shannon-Wiener index, community height, and biomass also increase. The community height and biomass within the shrublands are higher than outside, with species richness within the shrublands being higher than outside during the semi-fixed and fixed sandland stages. In the 0−10 cm and 10−20 cm soil layers, SWC displays an increasing trend, peaking in the sandy grassland stage (1.2%), and is higher within the shrublands than outside. The SWC at 10−20 cm is higher at 0−10 cm. In both layers, clay and silt content gradually increases with the degree of vegetation recovery in the sandy land and is higher within the shrublands than outside, while the opposite is true for sand content. In both soil layers, SOC gradually increases with the degree of vegetation recovery, peaking in the sandy grassland stage ($4.12\ g\cdot kg^{-1}$) and is higher within the shrublands than outside. TN increases from the semi-fixed to the fixed sand land stage, with higher levels within the shrublands than outside at all stages. Soil pH within the shrublands decreases as the degree of vegetation recovery increases. No significant change in TP is observed. Additionally, soil physicochemical characteristics account for 59.6% and 46.9% of the vegetation changes in both soil layers within and outside the shrublands, respectively, with the main influencing factors being soil particle size, TN, SWC, and SOC. This study demonstrates that during vegetation recovery in desertified grasslands, *C. microphylla* shrublands promote vegetation growth and development by improving the soil physicochemical characteristics under the shrublands, including soil particle size, SWC, SOC, and TN.

Keywords: desertified grassland vegetation recovery; *Caragana microphylla*; vegetation characteristics; soil physicochemical characteristics; Hulun Buir